

Rhéologie du béton frais remanié

III - L'essai au cône d'Abrams modifié

François de LARRARD

Docteur de l'École nationale des Ponts et Chaussées
Adjoint au chef de la division Méthodes
et matériels d'exécution des chantiers routiers
Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Chiara F. FERRARIS

Docteur de l'École polytechnique fédérale de Lausanne
Physicienne au National Institute
of Standard and Technology
Gaithersburg, Maryland
United States of America

RÉSUMÉ

On relate dans ce troisième article de la série « Rhéologie du béton frais remanié » le développement d'un essai simple de chantier, destiné à fournir une évaluation des deux caractéristiques de Bingham. Le principe consiste à mesurer le temps nécessaire pour que la surface supérieure de l'échantillon de béton, dans le cône d'Abrams, s'affaisse d'une hauteur de 10 cm. Les détails du montage expérimental et du mode opératoire sont décrits, et les résultats de cet essai sur les soixante-dix-huit mélanges du programme sont analysés. Des modèles semi-empiriques sont proposés pour le seuil de cisaillement et pour la viscosité plastique. Le domaine d'application de l'essai, pour l'évaluation de la viscosité, est constitué par les bétons d'affaissement compris entre 12 et 26 cm. L'essai au cône d'Abrams modifié, si sa validité se confirme dans l'avenir, pourrait représenter un bon complément au rhéomètre BTRHEOM, bien adapté aux exigences du contrôle quotidien de la qualité, le rhéomètre étant réservé à la formulation ou à l'expertise des cas critiques.

MOTS CLÉS : 32 - Rhéologie - Béton frais - Essai - Chantier - Caractéristiques - Slump test - Mesure - Temps - Montage - Méthode d'essai - Modèle numérique - Viscosité.

Introduction

On a rappelé dans le premier article de la série « Rhéologie du béton frais remanié » [1] l'historique du développement des rhéomètres à béton actuels. Entre ces outils, précieux pour le formulateur mais sophistiqués et coûteux, et les essais courants de chantier, il existe un fossé qu'il importe de combler. En effet, étant donnés les aléas de production du matériau béton - variabilité des constituants, difficultés dans la maîtrise du dosage en eau - une composition n'est pas déterminée et caractérisée une fois pour toutes. Elle doit au contraire faire l'objet d'un contrôle de qualité rigoureux, et peut dans certains cas être corrigée d'une gâchée à l'autre, de façon à améliorer l'uniformité des propriétés les plus importantes du matériau, parmi lesquelles figurent les propriétés rhéologiques.

Si, dans un premier temps, on réduit le comportement rhéologique du béton frais au couple de paramètres « seuil de cisaillement - viscosité plastique », on doit se demander dans quelle mesure la panoplie des essais technologiques actuels permet leur évaluation, même grossière. Alors que l'essai au cône d'Abrams, ancêtre du genre et vedette incontestée, donne une indication raisonnablement corrélée au seuil de cisaillement [2], les autres tests - maniabilimètre, table à secousse DIN, appareil VEBE, etc. [3] - fournissent des résultats peu exploitables sur le plan rhéologique. En effet, dans la plupart de ces essais, le béton s'écoule sous l'effet de sollicitations dynamiques. Il met donc en jeu le comportement du béton sous vibration, dont rien n'indique qu'il soit directement lié au comportement du béton remanié.

Il ressort donc de ce rapide examen de l'état de l'art qu'aucun des essais « rustiques » actuels (par opposition aux rhéomètres) ne permet d'apprécier la viscosité plastique des bétons. Or, ce paramètre prend une importance accrue dans les bétons modernes. Pour les bétons à hautes performances (BHP), il constitue même souvent le paramètre critique, contrôlant la pompabilité [2], la facilité de finition ou l'aspect du béton après décoffrage. On présente donc, dans cet article, une modification de l'essai au cône d'Abrams qui, sur la base de la mesure d'un temps d'affaissement partiel, permet d'apprécier à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, pour une certaine gamme de consistance.

Le cône d'Abrams modifié

Travaux précédents de Tanigawa et al.

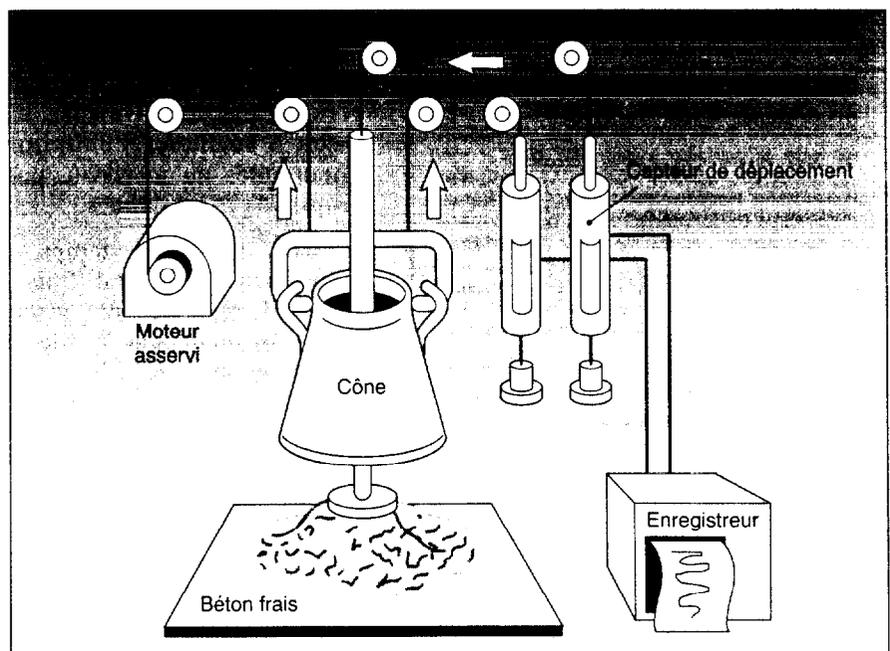
L'équipe du professeur Tanigawa au Japon a joué un grand rôle dans le développement des applications de la rhéologie du béton frais. En particulier, ces chercheurs ont procédé à des analyses par éléments finis des essais rhéologiques courants, de façon à établir des équivalences entre les indications de ces essais et les grandeurs rhéologiques fondamentales [4]. Cependant, faute de rhéomètre à béton, la plupart de leurs calculs n'ont pu être validés par l'expérience, ce qui a limité leurs applications, et ce qui explique pourquoi ce pays, pourtant très actif dans la recherche sur les propriétés du béton frais, n'a pas encore réellement fait passer l'utilisation des concepts de rhéologie dans la pratique industrielle.

Concernant l'essai au cône d'Abrams, Tanigawa et al. ont procédé à des enregistrements de la hauteur de la section supérieure du cône en fonction du temps (fig. 1), et ont montré que la courbe obtenue pouvait être simulée par éléments finis, en analysant le béton frais comme un matériau de Bingham. Bien sûr, la courbe dépend à la fois du seuil et de la viscosité. La valeur finale de cette courbe traduisant le seuil de cisaillement, on pouvait penser que la cinétique était davantage contrôlée par la viscosité plastique. Considérant le fait que le cône d'Abrams est actuellement le seul essai pratiqué mondialement, par la plupart des praticiens, on a donc décidé de le prendre comme point de départ, et d'effectuer les modifications minimales devant permettre l'appréciation des deux caractéristiques rhéologiques fondamentales.

Conception et dimensions du cône d'Abrams modifié

Le but de cette recherche étant de développer un essai avant tout simple et robuste, il paraissait difficile de recommander un enregistrement complet de la courbe (affaissement, temps). Il aurait fallu pour cela prévoir une acquisition de données électronique, et l'exploitation de la courbe aurait également supposé une certaine sophistication. Par contre, on pouvait penser qu'à même affaissement final, les courbes se seraient différenciées par leur cinétique. Ainsi, la mesure du temps nécessaire pour atteindre une hauteur intermédiaire entre les valeurs initiale et finale apparaissait *a priori* comme un bon moyen de discriminer les bétons par leur viscosité plastique.

Fig. 1 - Montage expérimental de Tanigawa et al. pour l'enregistrement de l'affaissement au cône en fonction du temps [4].



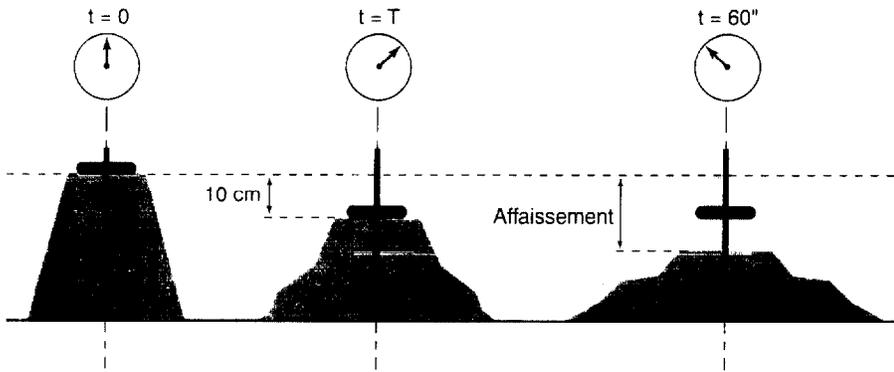


Fig. 2 - Principe de l'essai au cône d'Abrams modifié. T est le temps d'affaissement partiel, ou temps d'affaissement.

Le choix de cette hauteur d'affaissement partiel devait se faire en considérant deux risques :

- > une hauteur trop faible aurait conduit à des temps d'affaissement très petits, et donc à une mauvaise précision relative de la mesure ;
- > une hauteur trop importante aurait exclu tous les bétons dont l'affaissement final serait inférieur à cette valeur.

Le domaine des bétons caractérisables par les outils de la rhéologie étant à peu près, comme déjà dit, celui pour lequel l'affaissement est supérieur à 10 cm, c'est cette grandeur qu'on a logiquement choisie pour la hauteur d'affaissement partiel.

Le montage de Tanigawa, dans lequel la mesure de l'affaissement s'effectue « par le dessus », pourrait s'avérer fragile dans l'environnement du chantier. C'est pourquoi on a préféré adopter une règle fixe, solidaire de la plaque horizontale, traversant l'échantillon de béton et coïncidant avec son axe de symétrie. Cette symétrie étant en principe conservée pendant l'écoulement du béton, l'axe ne devait pas trop perturber l'écoulement du matériau. Ce point a été ultérieurement vérifié.

Pour la mesure du temps d'affaissement partiel, le plus simple était d'utiliser un chronomètre, actionné par l'opérateur sur la base d'un critère visuel (comme dans le maniabilimètre LCL ou l'essai VEBE). Au départ, on avait pensé pratiquer une indentation sur l'axe central. Le chronomètre, déclenché au début du levage du cône, devait être arrêté lorsque ce repère sortirait du béton. L'expérience a cependant montré qu'on pouvait avoir des difficultés à repérer cette indentation, et qu'il valait mieux s'en servir comme d'un frein, arrêtant le glissement d'un plateau supérieur posé sur le béton frais. On est ainsi arrivé à la conception décrite sur la figure 2. Les dimensions de l'appareil et le montage expérimental sont présentés sur les figures 3 et 4.

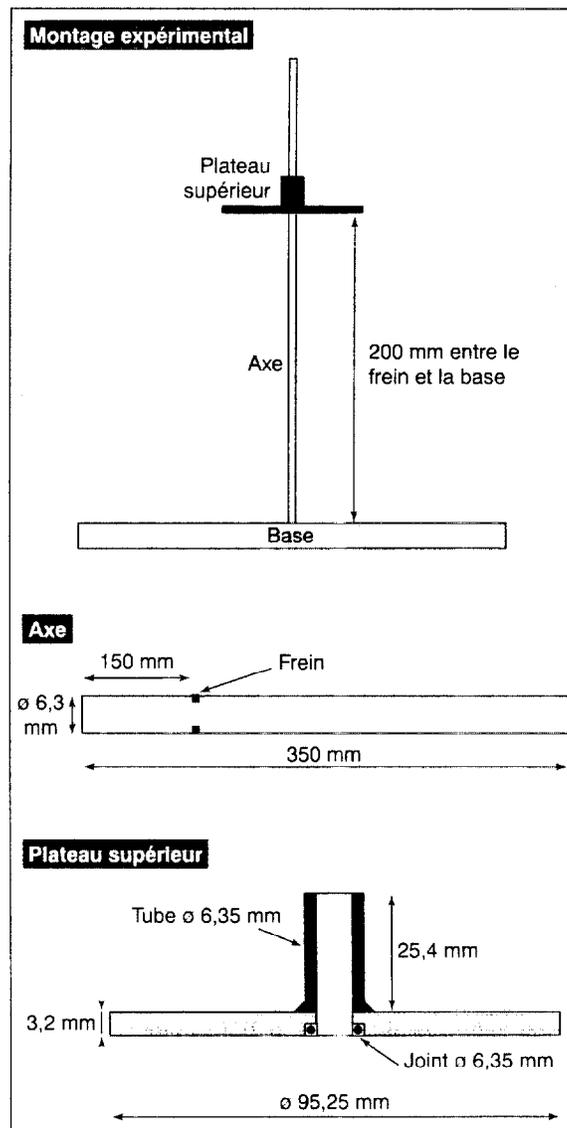


Fig. 3 - Dimensions de l'appareil utilisé dans les essais.

Fig. 4 - Montage expérimental



a. Vue de dessus du cône et du disque en position initiale.



b. Axe fixé sur la base, disque en position finale, à côté du cône.

Mesure du temps d'affaissement

Mode opératoire de mesure du temps d'affaissement

Au démarrage de l'essai, on dispose :

- de la base horizontale, sur laquelle est fixé l'axe ;
- du cône d'Abrams (moule conique sans fond) ;
- du disque glissant (plateau supérieur) ;
- d'un joint en caoutchouc, dont l'objet est d'empêcher la pénétration d'éléments fins dans l'axe du disque, afin de ne pas ralentir la chute de ce dernier ;
- d'une tige pour piquer le béton ;
- d'une petite truelle permettant le talochage de la face supérieure du cône ;
- d'une règle graduée pour mesurer l'affaissement ;
- d'un chronomètre au centième de seconde.

La mise en place du béton se fait de la même façon que dans l'essai normalisé (ASTM C143-90 ou NFP **). Les différentes étapes sont les suivantes :

1. enduire l'axe central de graisse (jusqu'au frein), après l'avoir soigneusement nettoyé ;
2. mouiller au moyen d'une éponge humide la base et les parois intérieures du moule ;
3. placer le moule sur sa base, en s'assurant que l'axe est bien centré par rapport à la section supérieure ;
4. tout en maintenant le moule plaqué sur sa base (soit par des attaches prévues à cet effet, soit en appuyant sur des ergots soudés sur l'extérieur du moule), le remplir de béton en trois couches, chaque couche étant piquée de vingt-cinq coups ;
5. talocher la face supérieure de l'échantillon, en s'assurant qu'elle se trouve parfaitement de niveau avec les parois du cône ;
6. nettoyer la partie affleurante de l'axe à l'aide d'un chiffon ;
7. faire glisser le joint et le disque le long de l'axe vertical, jusqu'au contact entre le disque et la surface supérieure du béton ;
8. soulever verticalement le moule tout en déclenchant le chronomètre ;
9. pendant la chute du béton, observer continuellement le disque (à travers le trou supérieur du moule) et arrêter le chronomètre dès que le disque s'immobilise ;
10. retirer le disque de l'axe ;
11. une fois l'affaissement stabilisé, ou au plus tard une minute après le démarrage de l'essai, mesurer l'affaissement avec la règle graduée.

Mesures sur soixante-dix-huit mélanges

L'essai tel que décrit a été pratiqué sur tous les mélanges du présent programme, et les valeurs de temps d'affaissement partiel (qu'on appellera par la suite temps d'affaissement) sont données dans les tableaux V à VII du premier article de la série [1]. Les mortiers et bétons dont l'affaissement final était inférieur à 10 cm ayant été exclus, les temps mesurés varient entre 0,63 et 15,97 secondes.

La première question qu'on s'est posée était de savoir si le temps minimal était bien contrôlé par le matériau, ou si, au contraire, le disque s'était décollé du béton pendant la chute. Or, le temps théorique de chute d'un corps soumis à la gravité, pour une hauteur h de 10 cm, est égal à $\sqrt{2h/g}$, soit 0,14 s. Deux mesures (à vide) de ce temps ont d'ailleurs donné des valeurs de 0,16 et 0,15 s. On en déduit donc que le danger de décollement est inexistant (du moins avec les bétons testés). Par ailleurs, la précision de la mesure est de l'ordre de $1/10^{\circ}$ de seconde, avec un même opérateur. L'erreur de reproductibilité est certainement plus importante, car on ne contrôle pas précisément la vitesse de montée du

moule. C'est d'ailleurs une caractéristique générale de l'essai au cône d'Abrams que de dépendre en partie de l'opérateur [5].

On s'est ensuite assuré de la cohérence des mesures en examinant la variation du temps d'affaissement à l'intérieur de chaque groupe de mélange [1]. À de très rares exceptions près, les temps s'ordonnent bien en fonction du volume d'eau : ils décroissent systématiquement quand le dosage augmente. Par ailleurs, la comparaison des valeurs moyennes par grande famille de matériaux est également instructive et encourageante. Les temps d'affaissement des mélanges non adjuvantés ont une moyenne de 1,51 s (écart-type 0,54 s), alors que les valeurs relatives aux mélanges adjuvantés sont en général supérieures, et beaucoup plus différenciées (moyenne de 4,80 s, écart-type de 4,66 s). On peut donc espérer retrouver avec cet essai la plus forte viscosité des bétons adjuvantés. D'ailleurs, les valeurs obtenues pour les mélanges dits « intermédiaires » s'ordonnent aussi logiquement, et épousent l'évolution constatée de la viscosité plastique (alors que les affaissements finaux sont comparables).

Identité des affaissements finals obtenus entre essai classique et essai modifié

Avant de voir comment calculer pratiquement la viscosité à partir du temps d'affaissement, vérifions que les modifications apportées à l'appareil (présence d'un axe central et d'un plateau supérieur) ne modifient pas significativement la valeur finale de l'affaissement.

La masse du disque (212 g) augmente la contrainte verticale dans l'échantillon d'une valeur maximale égale à son poids réparti sur la surface supérieure du cône, soit 0,27 kPa. Lorsque le disque atteint le frein, la hauteur h du béton est par définition égale à 20 cm, d'où une contrainte verticale de compression à la base de l'échantillon égale à $\rho g h$ (où $\rho \approx 2400 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique du béton frais, et g l'accélération de la pesanteur), soit environ 4,8 kPa. On voit donc que la contrainte due au disque est au maximum de l'ordre de 6 % de celle due au béton. Par ailleurs, le frottement du béton le long de l'axe a au contraire tendance à réduire l'affaissement final. Afin de vérifier que ces effets sont négligeables, on a refabriqué une gâchée des six compositions suivantes : BHP9C-BHP1C-BO8B-BO8A-BO1A-BO1C, choisies parce que représentatives de l'éventail des affaissements finals obtenus. Les deux essais (essai au cône classique et essai modifié) ont été mis en œuvre en parallèle. Comme on peut le voir sur la figure 5, les résultats sont identiques, à la dispersion de l'essai près (écart moyen entre les mesures égal à 1,1 centimètre).

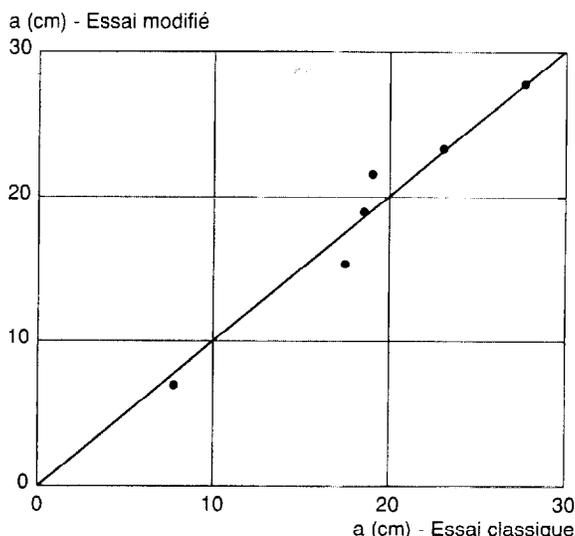


Fig. 5 - Comparaison des valeurs d'affaissement entre l'essai au cône d'Abrams classique et l'essai modifié.

Estimation des paramètres rhéologiques fondamentaux à partir de l'essai au cône d'Abrams modifié

Modèles pour l'évaluation du seuil de cisaillement

À partir de calculs aux éléments finis mis en œuvre sur un modèle de cône d'Abrams, et en négligeant l'influence de la viscosité plastique, Hu a proposé une relation générale entre affaissement au cône d'Abrams s et seuil de cisaillement τ_0 [2], de la forme :

$$\tau_0 = \frac{\rho}{27} (30 - s) \quad (1)$$

où ρ (masse volumique) est exprimée en kg/m^3 , τ_0 en Pa et s en cm. Cette relation s'est avérée assez juste pour décrire le seuil au sens de Bingham, en excluant cependant les bétons dont la viscosité était supérieure à 300 Pa.s.

Dans le cas présent, les prévisions fournies par ce modèle pour les seuils au sens de Herschel-Bulkley sont raisonnables (erreur moyenne de 195 Pa, pour des seuils balayant la plage (100 ; 2 000 Pa), (cf. fig. 6). On constate cependant une sous-estimation systématique du seuil dans le domaine des faibles valeurs, qui est celui des bétons autonivelants. La précision du modèle de Hu peut alors être améliorée par une correction empirique, consistant à ajouter un terme constant. L'équation suivante :

$$\tau_0 = \frac{\rho}{34,7} (30 - s) + 212 \quad (2)$$

fournit un écart moyen par rapport aux mesures de 162 Pa (fig. 7). L'amélioration est surtout notable pour les mélanges très fluides.

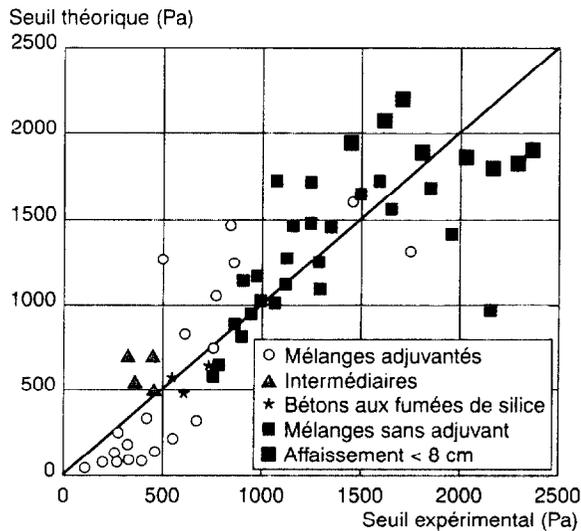


Fig. 6 - Comparaison entre seuils de cisaillement expérimentaux (au sens de Herschel-Bulkley) et prévisions du modèle de Hu [2].

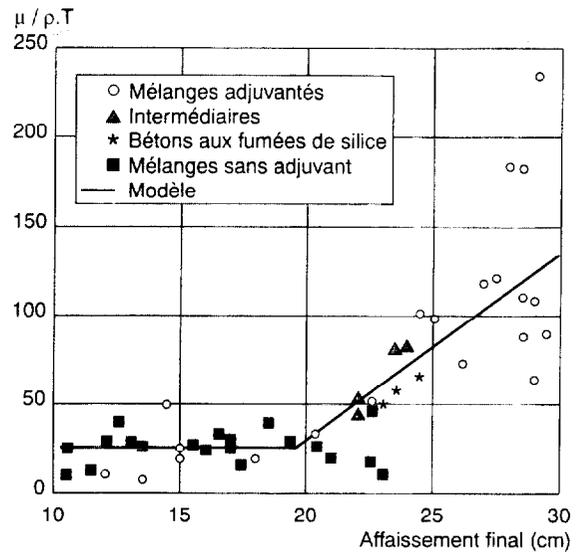


Fig. 8 - Relation entre le rapport $\mu/\rho T$ et l'affaissement final.

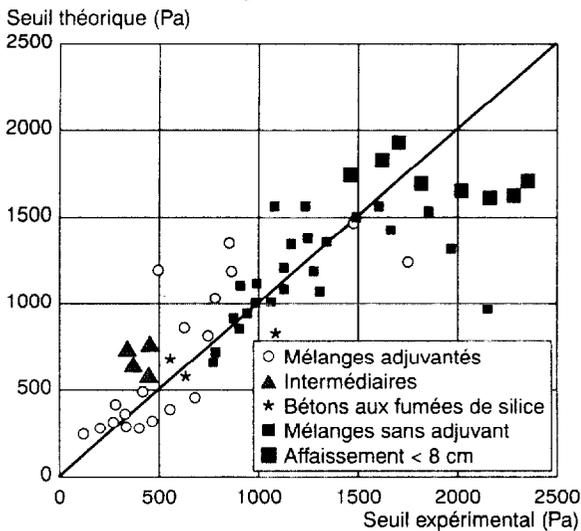


Fig. 7 - Comparaison entre seuils de cisaillement expérimentaux (au sens de Herschel-Bulkley) et prévisions de l'équation 2.

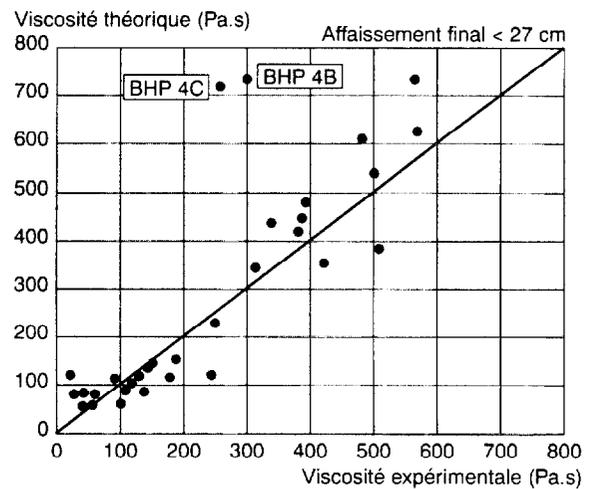


Fig. 9 - Comparaison entre valeurs expérimentales et prévisions du modèle de viscosité plastique (équation 3), pour les bétons d'affaissement compris entre 12 et 26 centimètres.

Un modèle semi-empirique pour l'évaluation de la viscosité plastique

Intéressons-nous à présent au deuxième paramètre de Bingham (viscosité plastique μ), que nous proposons de garder comme indicateur de la rhéologie du matériau, avec cependant des modifications quant à son calcul [1]. Pour son évaluation à partir des résultats de l'essai au cône d'Abrams modifié, on peut s'appuyer sur le principe selon lequel, à même affaissement final et même densité, une différence de temps d'affaissement reflète une différence de viscosité plastique. Sur la base d'une analyse dimensionnelle du phénomène, on peut

s'attendre à ce que la quantité $\mu / \rho g T$ (où μ est la viscosité plastique, et T le temps d'affaissement) ne dépende que de l'affaissement final. Cette assertion est assez bien confirmée par l'analyse des données expérimentales (cf. fig. 8), sauf pour les très grandes valeurs d'affaissement. Pour ces dernières, qui correspondent aux bétons autonivelants, la dispersion est plus forte ; elle est probablement explicable par la faiblesse des temps d'affaissement mesurés, ainsi que par la plus forte probabilité d'apparition de la ségrégation.

Restreignant le champ d'application de la mesure du temps d'affaissement aux mélanges

de l'affaissement final inférieur à 27 cm, on réalise un lissage des données par la fonction suivante :

$$\frac{\mu}{\rho T} = \text{Max} [25 ; 10,8 (s - 17,5)] \quad (3)$$

équation dont on déduit directement une expression de la viscosité plastique en fonction de la densité, de l'affaissement final (en cm) et du temps d'affaissement en secondes. L'erreur moyenne fournie par ce modèle, pour tous les bétons d'affaissement compris entre 12 et 26 cm, est de 66 Pa.s (fig. 9). Les deux seuls mélanges qui s'écartent fortement de la droite de corrélation sont les bétons BHP4B et BHP4C. Or, ces deux mélanges peuvent être qualifiés de pathologiques, car ils comportent un excès de gros gravillons (ce qui est rare dans la pratique, particulièrement pour les mélanges adjutants), et ont présenté un manque de cohésion lors des essais au cône (cf. tableau VI de [1]).

Le modèle présenté fournit donc une évaluation satisfaisante de la viscosité plastique des bétons, avec évidemment une précision moindre que celle apportée par le rhéomètre. Des abaques sont donnés sur la figure 10 permettant une évaluation rapide des caractéristiques rhéologiques à partir des indications de l'essai au cône d'Abrams modifié, pour un béton de masse volumique égale à 2 400 kilogrammes par mètre cube.

Conclusion

On a présenté dans ce troisième article de la série « Rhéologie du béton frais remanié » une modification de l'essai au cône d'Abrams, destinée à permettre une évaluation des deux caractéristiques de Bingham du béton frais. Le mode opératoire a été décrit en détail, et les résultats de l'essai ont été communiqués, dans [1], pour les soixante-dix-huit mélanges préparés. Les conclusions sont les suivantes :

- l'affaissement au cône, combiné avec la densité du béton, permet d'évaluer le seuil de cisaillement des bétons avec une certaine précision, dans la gamme des consistances très plastique à fluide (affaissements supérieurs à 10 centimètres) ;
- le temps d'affaissement, combiné avec les mesures précédentes, peut fournir une évaluation de la viscosité plastique, pour les bétons dont l'affaissement est compris entre 12 et 26 cm. Le domaine d'application est donc plus étroit. Par chance, c'est le domaine des bétons à hautes performances (BHP), tels qu'on les met en œuvre aujourd'hui sur les chantiers français.

L'objectif de ce troisième volet de recherche est donc atteint, au moins pour une catégorie de bétons ; on est en présence d'un nouvel essai, simple, peu coûteux, facile à mettre en œuvre et

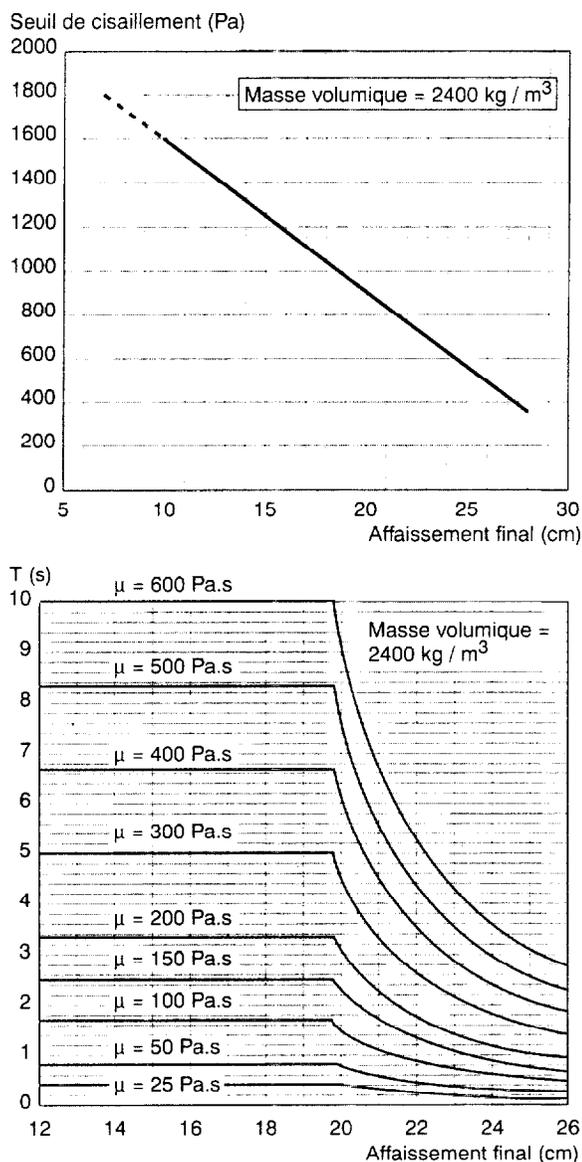


Fig. 10 - Abaques pour le calcul du seuil et de la viscosité des bétons à partir des indications de l'essai au cône d'Abrams modifié (pour un béton de masse volumique égale à 2 400 kilogrammes par mètre cube).

permettant d'évaluer les caractéristiques rhéologiques de mélanges correctement formulés (i.e. présentant, de par leur composition granulaire, une résistance à la ségrégation acceptable). Il ne faut cependant pas perdre de vue les points suivants :

- la répétabilité et la reproductibilité de l'essai au cône d'Abrams modifié restent à évaluer ;
- la pertinence du modèle reliant le temps d'affaissement à la viscosité plastique doit être vérifiée avec d'autres matériaux, issus de constituants différents ;

➤ l'essai donne des évaluations approchées des grandeurs rhéologiques, qui peuvent convenir pour contrôler le matériau, mais qui resteront insuffisantes pour atteindre une formulation optimale ;

➤ le rhéomètre reste à notre avis un outil précieux pour une caractérisation du béton en continu à partir de sa fabrication, pour étudier le

comportement sous vibration, et pour obtenir des mesures dont la précision permette des extrapolations (cas du pompage). Il s'applique, par ailleurs, à une gamme de consistance plus large.

C'est pourquoi le nouvel essai développé doit être compris comme un complément au rhéomètre, et non comme un substitut.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- | | |
|--|---|
| <p>[1] de LARRARD F., FERRARIS C.F. (1998), Rhéologie du béton frais remanié. I : plan expérimental et dépouillement des résultats, <i>Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées</i>, 213, janv.-févr., pp. 73-89.</p> <p>[2] HU C. (1995), <i>Rhéologie des bétons fluides</i>, Études et recherches des LPC, OA 16, 203 pages.</p> <p>[3] FERRARIS C.F. (1996), <i>Measurement of rheological properties of high-performance concrete :</i></p> | <p><i>state-of-the-art report</i>, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5869, July, 33 pages.</p> <p>[4] TANIGAWA Y., MORI H., TSUTSUI K., KUROKAWA Y. (1986), <i>Estimation of rheological constants of fresh concrete by slump test and flow test</i>, Transactions of the Japan Concrete Institute, vol. 8, pp. 65-72.</p> <p>[5] BARTOS P. (1992), <i>Fresh concrete : properties and tests</i>, Elsevier.</p> |
|--|---|

ABSTRACT

The Rheology of Disturbed Fresh Concrete III. The Modified Slump Cone Test

F. de LARRARD - C.F. FERRARIS

This third paper describes the development of a simple worksite test intended to evaluate the two Bingham characteristics. The principle is to measure the time taken for the upper surface of the concrete sample, placed in an slump cone, to slump by 10 cm. Details of the experimental setup and method are given and an analysis is performed of the results of the test on the 78 mixes in the programme.

Semi-empirical models are suggested for the shear threshold and the plastic viscosity. The test can be used to evaluate the viscosity of concretes whose slump is between 12 and 26 cm. If in the future the validity of the modified slump cone test is confirmed it could provide a valuable supplement to the BTRHEOM rheometer test, being used for day-to-day quality control with the rheometer reserved for mix design or investigating critical cases.